

С. В. Евдокимов,

аспирант

ООО «УК Мечел-Транс»,

Москва

О. В. Леонова,

проф. канд. техн. наук

Московская государственная академия водного транспорта —

филиал ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,

Москва

Б. Е. Попов,

начальник отдела НК, эксперт высшей квалификации

ООО «Инженерно-консультативный центр “Кран”»,

Москва

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РЕСУРСА ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ МЕТОДОМ КОЭРЦИТИВНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Обоснована возможность использования нового магнитного метода по изменению величины коэрцитивной силы для оценки технического состояния и прогнозирования ресурса элементов металлоконструкции и крана в целом. Предложена новая конструкция плоского образца с переменным сечением, позволяющая оперативно оценивать техническое состояние материала и определять время безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: коэрцитивная сила, структуроскопия, порталный кран, плоский образец с переменным сечением, ресурс, безопасная эксплуатация.

INNOVATIVE APPROACHES TO ASSESSING THE RESOURCE OF PORTAL CRANES BY THE COERCITIVE STRUCTUROSCOPY METHOD

The possibility of a new magnetic method for changing the value of the coercive force for assessing the technical condition and predicting the resource of the elements of the metal structure and the crane as a whole is substantiated. A new design of a flat sample with a variable cross section is proposed, which allows to quickly evaluate the technical condition of the material and determine the time of safe operation.

Keywords: coercive force, structuroscopy, portal crane, flat sample with variable cross-section, resource, safe operation.

Целью работы является оценка реального срока эксплуатации конкретного порталного крана (далее — ПК) для повышения безопасности его эксплуатации и своевременного информирования владельца крана о реальном сроке эксплуатации данного подъемного сооружения.

В качестве основного параметра (информационного показателя) выбрана коэрцитивная сила H_c (А/см) как наиболее чувствительная к изменению плотности дислокаций и структуры и связанная зависимостью с физико-механическими свойствами металла. В плане информационной чувствительности к изменениям в металле по мере развития и накопления в нем усталостных явлений магнитная характеристика (коэрцитивная сила) оказалась самой эффективной. В отличие от дефектоскопических методов контроля, маг-

нитный метод по изменению величины коэрцитивной силы (далее — МКС) можно отнести скорее к методам структуроскопии, так как в рамках традиционной дефектоскопии методы выявляют размеры дефектов, однако не позволяют оценивать реальное техническое состояние материала основных силовых элементов ПК и давать прогнозы о возможности их дальнейшей эксплуатации [1].

Высокая чувствительность основного магнитного параметра, коэрцитивной силы H_c (А/см) к изменениям свойств стальных конструкций при эксплуатации связана с ее зависимостью от определяющих параметров структурного состояния металла (размер зерна, плотность дислокаций, текстура, микропластическая деформация, остаточные напряжения, доменная структура) [2; 3]. Как показано учеными в области теории и пра-

ктики магнитных измерений, коэрцитивная сила H_c (А/см) следующим образом связана с главными структурными параметрами металла:

- чем больше размер зерна, тем меньше коэрцитивная сила;

- доменные границы удерживаются дислокациями, искривляются, а при достижении критического магнитного поля $H_{кр}$ границы скачком смещаются, то есть доменные границы отрываются от дефектов;

- с ростом включений, коэрцитивная сила возрастает;

- с ростом внутренних (остаточных) напряжений, коэрцитивная сила растет прямо пропорционально внутренним напряжениям, ширине доменной границе и деформационному параметру;

- с ростом пластической деформации исходная коэрцитивная сила возрастает с учетом марки сплава;

- коэрцитивная сила напрямую связана с кристаллографией решетки и доменов [2; 3].

Прирост значений коэрцитивной силы ΔH_c при нагружении металла от исходного состояния поставки H_{co} в процессе эксплуатации составляет 100–400 % в зависимости от марки стали. Немаловажно здесь и то, что, если металл при нагружении испытал хотя бы однократное воздействие, превышающее значение предела текучести $G_{0,2}$, текущее значение его $H_{ст.}$ в этой зоне уже никогда не вернется к исходному H_{co} , а перейдет в новое исходное состояние $H_{с.факт}$ [2]. Физическая связь H_c с накоплением повреждений за цикл при усталости аналогична механическому гистерезису при циклическом нагружении разупрочняемых низколегированных сталей, используемых в металлоконструкциях ПК в виде графиков (рис. 1) [4]. Кроме того, как показал С. Г. Сандомирский все основные магнитные параметры, связанные с изменениями

структуры и напряженно-деформационного состояния, могут быть рассчитаны через величину коэрцитивной силы металла. При наличии коэрцитиметра с приставным датчиком и отстройкой от зазора определение H_c в металле является самым простым способом контроля.

Коэрцитивная сила H_c и пластическая деформация ϵ_{pl} меняются одновременно, воспринимая эту нагрузку в процессе основных механических нагружений [4]. Поэтому условно подобные параметры H_c и ϵ_{pl} могут быть представлены в виде (1 и 2) [4], как:

$$H_c = \frac{B}{E} + \left(\frac{B}{K} \right)^{1/n}, \quad (1)$$

где B — остаточная индукция, Тл; E — модуль упругости, Н/м²; K — циклический коэффициент напряжения; n — циклический коэффициент упрочнения.

$$\epsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} \cdot \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad (2)$$

где σ — амплитуда нагружения, МПа.

Зависимость между механическими и магнитными характеристиками четырех марок сталей, применяемых для изготовления металлоконструкции ПК дана в таблице № 1 [5; 6]. Значения получены при испытании на растяжение образцов 6–8 мм толщины для получения механических характеристик материала и при измерении коэрцитивной силы коэрцитиметрами КРМ-Ц-К2М фирмы НПФ «СНР» с использованием приставного датчика Холла [4].

Для установления зависимостей между H_c – σ и H_c – ϵ на данный момент практикуется механические испытания на растяжение со ступенчатым

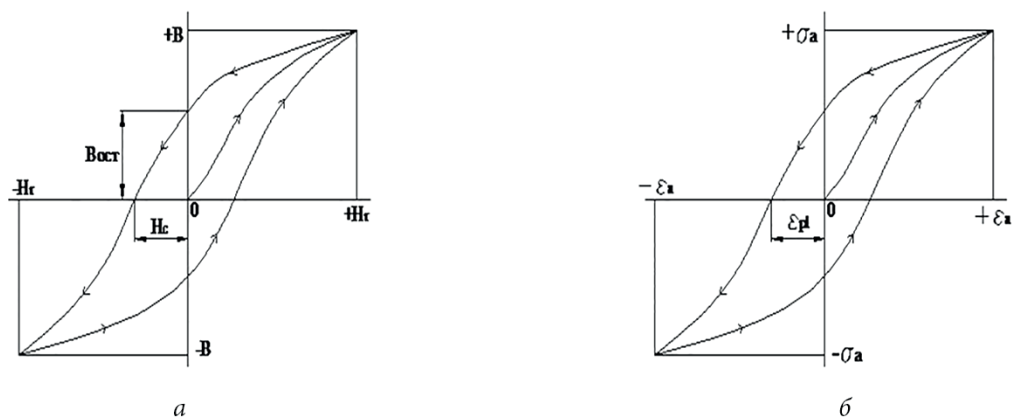


Рис. 1. Магнитная и деформационная петли гистерезиса

нагрузением и регистрацией магнитных и механических параметров. Для этого изготавливают образцы и проводят физико-механические испытания на испытательных электрогидравлических машинах, получая диаграмму ступенчатого нагружения с регистрацией коэрцитивной силы. Данная процедура длительна и затратна. С целью усовершенствования методики проведения таких испытаний, авторами предложены образцы с переменным сечением, в которых воспроизводятся четыре основных состояния:

- минимальное значение металла $\sigma_{ост}$ (после отжига), H_c ;
- исходное состояние металла, после изготовления конструкции, $H_{c.o.}$;
- состояние металла при достижении предела текучести σ_T , $H_{c.T.}$;
- состояние предразрушения металла, когда внутренние напряжения приближаются к пределу прочности металла σ_B и соответствующая ей коэрцитивная сила $H_{c.B.}$.

Образцы и соответствующие характеристики основного состояния должны быть получены для каждой марки стали.

Для того чтобы сохранить в образце состояние предразрушения, испытания необходимо останавливать в момент исчерпания пластической деформации, то есть перед образованием шейки, когда деформация (относительное удлинение) $\varepsilon = 5-7\%$. Это связано с тем, что в зоне разрыва металла уровень остаточных напряжений ниже,

а следовательно, ниже значения и коэрцитивной силы из-за процесса релаксации остаточных напряжений. Данную особенность необходимо учитывать, что при проведении технической диагностики металлоконструкций, имеющих трещины или после разрушения элементов конструкции.

Были определены размеры образцов с целью воспроизведения на одной заготовке, сечений (ширины) участков для реализации в них нагрузок, близких к различным предельным магнитным состояниям: $H_{c.p.}$, $H_{c.o.}$, $H_{c.T.}$ и $H_{c.B.}$. Расчет размеров сечений проводился по данным из сертификата и предварительным испытаниям на растяжение плоских образцов для получения предела текучести и предела прочности из материала, широко применяемого в краностроении при изготовлении ответственных элементов металлоконструкций, а именно из стали 09Г2С (ГОСТ 19281 [8]) в состоянии поставки. В результате расчета была определена геометрия плоского образца с переменными рабочими участками шириной 39, 50, 60 и 70 мм, толщиной 7 мм и длиной 750 мм (рис. 2), что позволило сформировать на одном образце три реперных состояния металла: упругого (соответственно толщине 60 мм), упруго-пластичного (соответственно толщине 50 мм) и исчерпания запаса пластичности (соответственно толщине 39 мм).

Преимуществом предлагаемого авторами образца с переменным сечением является возможность оперативно (без дополнительных действий

Таблица 1

Механические и магнитные свойства сталей применяемых в металлоконструкциях грузоподъемных кранов

Марки стали	Напряжения, МПа		Относительное удлинение, %	Значения коэрцитивной силы H_c , А/см		
	σ_T	σ_B		$H_{c.o.}$	$H_{c.T.}$	$H_{c.B.}$
ВСт3сп	245	420	26	2,8	5,5	7,0
St38b-2	240	430	25	2,0	5,2	6,2
09Г2С-12	350	500	21	3,5	7,5	9,5
10ХСНД	400	540	19	4,5	10,5	13,5

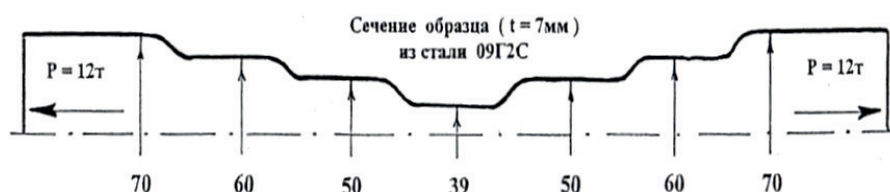


Рис. 2. Образец магнито-механического состояния для контроля остаточных напряжений в металле по величине коэрцитивной силы H_c (А/см)

и оборудования) определить состояние материала металлоконструкции ПК, с целью оценки степени повреждаемости металла металлоконструкции и времени ее безопасной эксплуатации. При этом оператору необходимо иметь измерительный прибор и плоские образцы с переменным сечением соответствующего материала. Учет толщины ис-

следуемой конструкции осуществляется с помощью переводного коэффициента, предложенного авторами [8].

Предлагаемые авторами статьи инновационные подходы к оценке ресурса порталных кранов позволяют более оперативно и точно проводить оценку их технического состояния.

Список литературы

1. *Леонова О. В.* Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и ресурса несущих элементов металлоконструкций порталных кранов / О. В. Леонова, Б. Е. Попов, С. В. Евдокимов // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы : XX Моск. междунаrod. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 2016.
2. *Безлюдько Г. Я.* Применения метода коэрцитивной силы сегодня / Г. Я. Безлюдько, Б. Е. Попов, Р. Н. Соломаха // В мире неразрушающего контроля. — 2015. — № 4. — С. 4–8.
3. *Попов Б. Е.* Магнитный контроль сопротивления усталости сварных соединений / Б. Е. Попов // В мире неразрушающего контроля. — 2015. — Т. 18, № 4. — С. 17–21
4. РД ИКЦ «Кран» 007-97-02. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследований и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности).
5. *Безлюдько Г. Я.* Главные особенности метода коэрцитивной силы как нового уровня эффективности и культуры слежения за усталостью и ресурсом металлоконструкций и оборудования / Г. Я. Безлюдько, Б. Е. Попов, Р. Н. Соломаха // В мире неразрушающего контроля. — 2014. — № 3. — С. 66–73.
6. *Popov B.* The method of magnetic coercimetry and its application to assess the residual life of lifting equipment / B. Popov, S. Evdokimov, O. Leonova, Y. Sokolov // Construction the Formation of Living Environment : XXII International Scientific Conference, 2019.
7. ГОСТ 19281–2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия : дата введ. 2015-01-01. — Москва : Стандартиформ. — 51 с.
8. *Леонова О. В.* Влияние толщины металла на коэрцитивную силу при проведении магнитной диагностики / О. В. Леонова, Б. Е. Попов, С. В. Евдокимов // Качество и жизнь. — 2018. — № 4 (20).